

1 SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS.

José A. Martín-Pereda

ETS. Ing. Telecomunicación

Universidad Politécnica de Madrid

1.1 Introducción.

Decía Pascal en sus “Pensamientos” que: *"La dernière chose qu'on trouve en faisant un ouvrage est de savoir celle qu'il faut mettre la première"*. Escribir las palabras que constituyen la Introducción de algo siempre suelen resultar más difíciles que lo que viene después. Por ello voy a intentar ser lo más breve posible y justificar tan solo el planteamiento que he tomado para las páginas que vienen a continuación. Y con este fin voy a apoyarme de nuevo en una idea de otro pensador francés, A. Comte. En su “Curso de Filosofía Positiva” puntualizaba un hecho que creo es totalmente cierto. Decía: *"On ne connaît pas complètement une science tant qu'on n'en sait pas l'histoire"*. Y la historia de las Comunicaciones Ópticas nos parece a todos tan reciente que pensamos que no existe. Pero no es así.

La historia de las Comunicaciones Ópticas es seguro que es tan antigua como el hombre. Pero no creo sea necesario llegar hasta tan lejos. En esta ocasión voy a quedarme en épocas más recientes. Como mucho voy a llegar al Siglo de las Luces que, por razones obvias, me parece el más indicado, y voy a continuar hasta los años 70 del presente siglo. El resto está en la mente de todos. En esa trayectoria temporal mi intención será la de mostrar qué ideas circulaban y probar que, en muchos casos, muy poco tenían que envidiar a las planteadas en nuestros días. No pretenderé con mis palabras añadir nada nuevo a lo que ya han dicho otros. Quizás tan solo realizar una tarea de síntesis de muchas cosas. No quiero que se me pueda objetar lo que decía Gore Vidal en una de sus novelas: *"Don't you realize,..., you have nothing to say, only to add?"*. Así es que sin más, pasemos ya al objetivo central de este capítulo.

1.2 Prolegómenos: Sistemas de telegrafía óptica.

Es ya un recurso muy gastado el empezar la historia de las Comunicaciones Ópticas con el anuncio de la caída de Troya. Dudo que todos los que lo mencionan hayan leído el trozo de “La Orestíada” en el que aparece. La cita ha ido pasando de unos a otros y, de constituir una referencia con una pequeña carga de erudición curiosa, se ha convertido en el recurso fácil al que todo el mundo se acerca, siguiendo una especie de ritual. Es cierto que Esquilo menciona el hecho. Pero también es seguro que antes, en pueblos y grupos mucho más primitivos, se habrían empleado técnicas similares para transmitir situaciones equivalentes mediante convenios acordados previamente. Quizás si debe mencionarse el caso de Troya es por la gran distancia que fue cubierta y, ya con la mentalidad de hoy, porque en esa transmisión se usaron algunos de los conceptos que empleamos en nuestros días: regeneración de señales, transmisión digital y repetidores.¹

Pero la verdadera historia, la que deja huellas, comenzó mucho tiempo después. Creo que solo tiene sentido hablar de comunicaciones cuando la información que se transmite es más que la simple confirmación o negación de algo que se espera. Ha de ser algo que necesite más que la recepción de un bit, como era el caso contado por Esquilo. Solo la escritura ha satisfecho ese principio antes de la presencia de los modernos sistemas de comunicación, aparte claro es, de la palabra. La comunicación entre barcos, por ejemplo, se basaba en la disposición, convenida de antemano, de una serie de banderas desplegadas de unas determinadas formas y que se traducían en un cierto mensaje, también pactado previamente. Las señales de humo, clásicas en las viejas películas del Oeste, por las que los indios transmitían sus mensajes, o los reflejos de rayos de sol sobre espejos en manos de los buscadores de oro, tenían también las mismas características. No existía la posibilidad de enviar información sobre algo que no se conociese de antemano. No pueden, por ello, designarse como verdaderos sistemas de comunicaciones ópticas. Aunque fueran señales de luz lo que se emplease y aunque transmitiesen un cierto tipo de información.

¹ Desde una perspectiva más próxima a nosotros, puede citarse otro hecho histórico semejante que, de igual manera, tuvo que ver con la transmisión de noticias por procedimientos ópticos. W.D. Smithers [1], describe el hecho de que “advisadores” (sic) mejicanos eran capaces de enviar largos y complicados mensajes mediante el simple uso de espejos de bolsillo y rayos de sol reflejándose en los mismos. Smithers especula con la posibilidad de que esta misma técnica fuese empleada por los aztecas para notificar a Moctezuma la llegada de Hernán Cortés a Veracruz, población que se encontraba entonces a una distancia de cuatro días de viaje de la capital.

Las verdaderas comunicaciones ópticas nacieron, al menos con el concepto expresado y si antes no hubo otras desconocidas al menos para el autor de estas líneas², con el telégrafo óptico de Claude Chappe. La Revolución Francesa, al mismo tiempo que daba lugar a una serie de ideas que hoy seguimos teniendo alrededor, también fue un incentivo de la capacidad creadora en casi todos los campos de la ciencia y la tecnología. El historiador inglés Thomas Carlyle, en su “Historia de la Revolución Francesa”[3], narró cuarenta años después lo que significó la invención de Chappe. Describe cómo desde el parque de Vincennes, del de Lepelletier Saint-Fargeau y desde los altos de Écouen, se habían levantado una serie de construcciones sobre las que se situaban unos postes articulados que se movían, “*in the most rapid mysterious manner*”, para transmitir señales. Es un “*Device ... worthy of the Republic*” dice Carlyle. Y cuenta cómo, gracias a este invento, desde la sala de sesiones de las Tullerías se transmitió la orden de que la ciudad de Conté pasara a llamarse Nord-Libre una vez había sido tomada por las fuerzas leales a la República. Antes de que hubiera pasado media hora, la respuesta llegaba y anunciaba al Ciudadano Presidente que la orden había sido cumplida. La firma era de Chappe. El nombre que recibía el invento era el griego de “telégrafo”, “el que escribe lejos”, “*Télégraphe sacré*” puede leerse en Carlyle. Cuando ahora decimos telégrafo damos por supuesto que es eléctrico. Pero el primero no fue eléctrico, sino óptico. Según parece, la primera propuesta de nombre por parte de Chappe para su sistema, fue la de “Tachygraphe”, “el que escribe deprisa”. Dado que el nombre no se ajustaba realmente a las características del proceso, pronto se sustituyó por el que hoy conocemos. Años después, Alejandro Dumas en “El Conde de Montecristo” aprovechaba también las propiedades del sistema de Chappe para darle algunas ventajas a su protagonista sobre sus adversarios. Pero esa es otra historia.

Las características del telégrafo de Chappe son bien conocidas. Tras la propuesta formal a la Asamblea Legislativa, el 22 de marzo de 1792, las primeras torres se instalaron en 1793 y llegaron a cubrir los 230 kilómetros que separan París de Lille. Un mástil fijo soportaba dos piezas móviles con las que se podían adaptar 98 configuraciones diferentes. Dada su lentitud, no permitía emplear transmisión alfabética por lo que requería una

² P. Russer, en [2], menciona el hecho de que Polibio, en el siglo II a.C., describe una estructura por la que se podía transmitir todo el alfabeto griego, mediante señales de fuego, usando un código de dos dígitos y cinco niveles. No he podido acceder a la fuente original, por lo que únicamente lo menciono sin aportar otros datos que los apuntados por Russer.

codificación cifrada. Parece que para alcanzar la distancia de París a Lille se invertía algo menos de 30 minutos, lo que quiere decir que la velocidad de transmisión era de entre 3 y 4 caracteres por minuto. A finales 1799 había unas 150 estaciones de telegrafía óptica en servicio, que se ampliaron cuando Napoleón Bonaparte tomó el poder. La más larga, de París a Milán, cubría 720 kilómetros y pasaba por Dijon, Lyon y Turín. Casi toda Francia se encontraba, a principios del siglo XIX, cubierta por líneas ópticas, al menos en sus ejes principales. Pero parece que Chappe no llegó nunca a saborear su triunfo. Por una serie de hechos que no son de este lugar, en 1805, víctima de una depresión irreversible, se suicidó arrojándose a un pozo, frente a la administración telegráfica en el Hotel Villeroy.

Cientos de kilómetros al norte, en Suecia, el ejemplo francés también tuvo eco. En 1794, Abraham Edelcrantz (cuyo nombre real era Abraham Niclas Clewberg) construyó una línea de telegrafía óptica que unía el Palacio Real, en el centro de Estocolmo, con el palacio de verano en Drottningholm, situado a unos siete kilómetros de aquél. El sistema que empleó, dada la escasa información que se había divulgado del invento de Chappe, fue prácticamente original. Un primer diseño era, en cierta forma, análogo al francés, o al menos a lo que viajeros por Francia contaban del sistema allí establecido. Mediante una matriz de nueve obturadores con uno más montado en la parte superior, un operador podía transmitir hasta 1024 señales diferentes, abriendo o cerrando cada obturador independientemente. En el caso de realizarse una transmisión alfabética, podían alcanzarse velocidades del orden de los 12 caracteres por minuto. A esta línea siguieron, poco después, otras que bordeaban la costa sueca. En un principio se pretendía enlazar con otra incipiente que se empezaba a construir en Dinamarca. Reveses militares impidieron que la propuesta se llevase a cabo.

Hacia 1840 casi todos los países europeos contaban con una o más líneas de telegrafía óptica en servicio. En Inglaterra, entre 1796 y 1816, el Almirantazgo construye líneas de Londres a Portsmouth, a Plymouth, a Yarmouth y a Deal. En Alemania, a partir de 1832 existe una línea que enlaza Berlín con Coblenza pasando por Postdam, Magdeburgo, Colonia y Bonn. Rusia entra en el juego un poco más tarde, en 1839, pero con un despliegue de medios impresionante. En esa fecha se inaugura una línea que cuenta con 220 estaciones y que une San Petersburgo y Varsovia.

En España, la situación no fue muy distinta a la de otros países. La aparición de la nueva forma de transmisión estimuló el desarrollo de otros sistemas equivalentes. En 1797,

el ingeniero militar Agustín de Betancourt y Molina, sin duda el primer ingeniero moderno de nuestro país, conjuntamente con su amigo el relojero Abraham Louis Breguet, redactaron una “Mémoire sur un nouveau Télégraphe et quelques idées sur la langue Telegraphique”, que presentaron al Directorio de la República Francesa, intentando competir con el allí existente. El ministro del Interior lo elevó a la Academia de Ciencias para que lo comparara con el de Chappe. En el comité que se formó para el estudio se encontraban personajes tan conocidos como Coulomb, Lagrange, Laplace y Borda. Chappe se negó a la prueba y ésta hubo de realizarse únicamente sobre la máquina de Betancourt. El resultado parece fue por completo satisfactorio, siendo más fiable y sencillo de manejar que el de su potencial competidor. A pesar de ello nunca llegó a instalarse en Francia. En su país, en España, aunque la Corona se interesó en principio por el invento y tuvo el propósito de instalar una línea entre Madrid y Cádiz, parece que solo se llegaron a construir cuatro torres entre Madrid y Aranjuez, que en 1800, según algunos historiadores, estaban plenamente operativas.

Muchos otros ingenios basados en los desarrollos anteriores fueron surgiendo en España a raíz del de Betancourt. El hito más significativo fue el que marcó el brigadier D. José María Mathé y Aragua que diseñó un sistema semafórico totalmente original y con el que el 2 de octubre de 1846 puso operativa la primera línea de telegrafía óptica, de larga distancia, entre Madrid e Irún [4]. Constaba de 52 torres que nacían en el cuartel de Guardias de Corps, conocido hoy como del Conde Duque, y que pasaban por Valladolid, Burgos, Vitoria y San Sebastián. En el transcurso de diez años, Mathé logró una red en España tan extensa como la que logró Francia en más de cincuenta. Se establecieron además de la línea anterior, otras dos que iban de Madrid a los Reales Sitios de Aranjuez y San Ildefonso, y un conjunto de líneas radiales que, partiendo de Madrid, llegaba una a Valencia y de allí a Barcelona, otra a Zaragoza y Pamplona, y, finalmente, otra que debía llegar a Cádiz, pasando por Sevilla. Cuando esta última estaba en construcción, el imparable desarrollo del telégrafo eléctrico y las ventajas que éste tenía sobre el óptico hicieron abandonar el proyecto, así como, poco a poco, el uso de la línea óptica.

El sistema de Mathé estaba compuesto, esencialmente, por una pieza móvil, denominada “indicador”, que podía ascender y descender libremente por el centro de un bastidor que tenía tres franjas oscuras, paralelas, separadas claramente entre sí. El indicador, mediante una polea graduada, llamada “volante”, podía tomar doce posiciones, diez de las

cuales se hacían corresponder con los números de cero a nueve, y las otras dos se asignaban a funciones identificadas por las letras “X” (repetición) y “M” (error). Una posición decimotercera, consistente en esconder el indicador a la vista, se empleaba para separar dos signos o dos frases. El código empleado era, como es lógico, decimal, existiendo diccionarios fraseológicos en los que se detallaba la codificación empleada. Parte de esta codificación parece fue empleada posteriormente en el telégrafo eléctrico.

Sin llegar a alcanzar un verdadero arraigo popular, el sistema fue dejando de emplearse a mediados del siglo pasado y de él solo quedan hoy los restos de muchas de las torres que se construyeron. En el lenguaje popular, estas torres se siguieron denominando “del telégrafo”. Todavía hoy, en las proximidades de Madrid, en Navacerrada, uno de las pistas de esquí continua designándose con ese nombre gracias a que muy cerca de allí estuvo instalada una de las torres de Mathé.

1.3 Antecedentes directos: Primeros dispositivos fotónicos.

Si los anteriores casos presentados eran ejemplos claros de sistemas de comunicaciones ópticas, los dispositivos empleados en ellos poco o casi nada tenían que ver con conceptos equivalentes a los que empleamos hoy en este campo. Eran comunicaciones ópticas, porque se empleaba información transmitida ópticamente, pero los instrumentos y los medios para llevarlas a cabo eran ampliamente empleados en otros campos: telescopios para conocer la información de la torre precedente, señales realizadas por procedimientos mecánicos y, sobre todo, torreros que las interpretaban. La introducción de dispositivos, al menos con la idea que hoy tenemos de ellos, necesitó esperar algunos años más. Y quizás su máximo representante fue Alexander Graham Bell.

La historia de Bell y las comunicaciones ópticas nació en su luna de miel en Inglaterra, entre 1877 y 1878. En esas fechas se acababan de publicar algunos trabajos de Robert Sabine, en “Nature”, en los que indicaba que el selenio podía emplearse como una de las partes que configurasen una pila galvánica de forma “...*that the slightest shadow or other variation in the intensity of the light caused a considerable variation in the electromotive force of the couple and a consequent indication.*”. Quizás basándose en esta idea, en mayo del 78 dio una conferencia en la Royal Institution de Gran Bretaña apuntando la idea básica de

su futuro invento: *“If you insert selenium in the telephone battery and throw light upon it, you change its resistance and vary the strength of the current you have sent to the telephone, so you can hear a shadow”*.

A su vuelta a Estados Unidos, y tras una serie de problemas derivados de la lucha por los derechos de su anterior invento, el teléfono, Bell intentó poner en práctica su idea. Con la ayuda de Sumner Tainter, un experimentado fabricante de equipos, inició a finales de 1879 el desarrollo de lo que ya llamaba “Fotófono”. El 19 de febrero del año siguiente sus experiencias dieron fruto. Bell y su ayudante pudieron percibir claramente una nota en el auricular de un teléfono conectado en serie con una célula de selenio y con una batería, cuando un haz de sol incidía sobre aquella, tras pasar a través de un disco perforado que giraba a una cierta velocidad. El paso para la transmisión de palabra parecía inmediato. Y así fue.

El sistema final se basaba en la reflexión de un haz luminoso, normalmente un rayo de sol, sobre un diafragma situado al final de una especie de trompetilla a través de la que Bell hablaba [5]. La señal acústica hacía vibrar al diafragma y con ello se conseguía una pequeña modulación de intensidad en la luz que se reflejaba. Ésta, a su vez, se recogía a una cierta distancia mediante un espejo que la enfocaba sobre un elemento sensible a la luz, la célula de selenio mencionada antes, generándose en ella una corriente eléctrica que actuaba, finalmente, sobre un altavoz. Las primeras palabra que parece se transmitieron fueron *“Hoy, hoy”*³, dichas por Tainter y, después la canción *“Auld Lang Syne”*. Bell se sintió tan orgulloso de su invento que estuvo a punto de poner a su segunda hija, que había nacido cuatro días antes, el nombre de *“Photophone”*. Afortunadamente para ella, alguien convenció a Bell de que no lo hiciera. En una carta escrita a su padre el 26 de febrero le decía *“I have heard articulate speech produced by sunlight; I have heard a ray of the sun laugh and cough and sing; ... I have been able to hear a shadow, and I have even perceived by ear the passage of a cloud across the sun's disk ...”* La ilusión que puso Bell en su fotófono fue muy superior a la que había puesto en el teléfono.

³ No es la traducción de *“today”*, sino una simple exclamación en inglés.

La primera transmisión pública tuvo lugar el 1 de abril de 1880, en la Massachusetts Avenue, en Washington, D.C., con una distancia de 79,62 metros entre emisor y transmisor. Experiencias posteriores parece llegaron alcanzar los 200 metros.

Es importante señalar, y de ahí el título dado a esta sección, que gran parte del trabajo de Bell se centró en el desarrollo de distintos tipos de elementos sensibles a la luz y de otros capaces de generar una mejor modulación de la luz transmitida. Esto muestra la importancia que le dio a los dispositivos que intervenían en el sistema. Entre los materiales que probó para el fotodetector se encuentran, además de los convencionales, otros puramente no eléctricos como discos de goma endurecida, zinc y antimonio. Estos trabajos dieron lugar a lo que más adelante se conocería como espectroscopia optoacústica. Por lo que respecta a la forma de modular la luz, una de las más indicativas de su anticipación al futuro es la que se refiere al uso de luz polarizada, método empleado hoy para realizar idéntica función en algunos tipos de láseres. Redes de difracción y espejos vibrantes fueron otras de las técnicas empleadas.

En 1896, Bell inició los trabajos necesarios para estudiar una fuente luminosa sin los inconvenientes que tenía la dependencia con el sol. Su fe en el fotófono seguía siendo ciega. Pero ese mismo año, las experiencias de Marconi con la radio eclipsaron todo lo que Bell estaba haciendo. Y así el fotófono quedó relegado al olvido. A pesar de ello, en 1921, un poco antes de su muerte, consideraba al fotófono *"In the importance of the principles involved ... as the greatest invention I have ever made; greater than the telephone"*.

Pero como quedaba claro de las experiencias de Bell, el uso del sol como fuente luminosa y del espacio libre como medio de transmisión no eran la mejor solución para el envío de señales. Era necesario que otros conceptos entraran en escena. Y el más evidente parecía el de que la luz fuera guiada a través de un medio que no la atenuara y pudiera encaminarse por caminos más o menos complejos. Las realizaciones de la época victoriana son también claros antecedentes de lo que hoy se ha conseguido.

Y el más señalado lo constituyen las experiencias realizadas por el irlandés John Tyndall. Una de las cualidades que más distinguían a este investigador era la de que, además de ser un reputado físico, era también un consumado charlista, con el extendido afán anglosajón de popularizar la Física. Debido a este hecho, durante gran parte de su vida se

dedico a dar, de tiempo en tiempo, giras por Gran Bretaña en las que enseñaba lo que la Física podía hacer. Y entre las experiencias que tenía estaba la de mostrar las propiedades de la luz. Con recipientes de vidrio, llenos de agua ligeramente turbia por gotas de leche añadida en suspensión, mostraba la reflexión y la refracción. Al final de la sesión, los asistentes podían ver cómo un haz de luz se propagaba en zigzag a lo largo de un chorro que caía del recipiente hasta que, debido a la turbulencia de éste, la radiación óptica se dispersaba. Dicho de otra forma, mostraba las propiedades de la reflexión total para transmitir luz a través de una guía líquida.

Tyndall jamás pensó que este hecho constituyese algo digno de ser comunicado a sus doctos colegas de la Royal Society. Y no lo hizo. Según parece, Bell sí le vio en una de sus giras por Boston, entre 1872 y 1873. Pero como la idea que primaba en Bell era la de la transmisión por el espacio libre, en la que encontraba un mayor grado de libertad, no aprovechó para nada las experiencias de Tyndall.

Sí lo hizo, en cambio, William Wheeler, un ingeniero cuya mayor preocupación era la iluminación de edificios. Si Bell puede considerarse un precursor en el diseño de dispositivos para comunicaciones ópticas, Wheeler puede serlo del guiado de luz a través de un vidrio. Su patente se basaba en la existencia de un gran foco de luz, situado en alguna parte de la casa, del que partían una serie de tubos de vidrio recubiertos de un metal con alta reflectividad. Apuntó el hecho de que la intensidad de luz generada por una fuente eléctrica variaba *"in a way greatly exceeding the square of the amount of the current times the resistance"*. En función de ello llegó a la conclusión de que era más favorable el uso de un foco de alta intensidad que el de varios más pequeños, situados en lugares alejados unos de otros y que *"perfection in artificial lighting ... consists of light of low intensity, radiating from many points in all directions"*. Wheeler no tuvo en cuenta, en sus diseños, la acumulación de absorciones en las sucesivas reflexiones que se iban produciendo, con lo que la intensidad de la luz quedaba casi anulada a los pocos metros. La forma de guiar luz estaba probada, pero faltaba mucho para que pudiera ser aprovechada de forma eficiente. Era necesario realizar un esfuerzo significativo en el terreno de la fabricación de fibras de vidrio.

Entre los primeros avances que merecen señalarse se encuentran los de Charles Vernon Boys, un ingeniero metalúrgico cuyo interés principal pronto derivó hacia el diseño de instrumentos científicos, llegando a formar parte del cuadro de profesores del departamento de

Física de lo que luego, en 1881, sería el Royal College of Science, en South Kensington. Para sus desarrollos de equipos precisaba de hilos muy finos con unas determinadas propiedades mecánicas. Los más empleados hasta entonces eran la seda sin tejer y el hilo de araña. Pronto Boys derivó hacia algunos minerales encontrando que las mejores propiedades se daban en el cuarzo. Y con él inició sus experiencias de obtención de fibras de vidrio. El método que empleó era increíblemente simple. Calentaba una varilla de vidrio hasta que estaba parcialmente fundida y, atando un extremo a la punta de una flecha mientras dejaba fijo el otro, la lanzaba con un arco de manera que se estirase hasta que la solidificación del vidrio lo permitiera. Dado que las flechas debían ser lo más ligeras posible, empleó pajas de cereales, lanzándolas en un habitación de 90 pies. Con este método llegó a conseguir fibras de vidrio de 0,0001 pulgadas, esto es, unas 2,5 micras. Las variaciones de diámetro no superaban un sexto de su valor, lo cual es significativo, dada la técnica empleada. Mecánicamente eran muy superiores a las obtenidas hasta entonces mientras que las propiedades ópticas apenas fueron estudiadas. Este hecho no es difícil de entender dado el pequeño diámetro de las mismas. Hasta muy recientemente no se ha llegado a saber cómo introducir luz eficientemente en las actuales fibras ópticas y éstas tienen diámetros varias veces mayores que las de Boys. El único uso óptico que las dio fue el de la realización de redes de difracción de 1/8 de pulgada, situando una serie de estas fibras, una al lado de la otra. Con ellas llegó a observar hasta el tercer orden de algunos espectros de difracción. La fibra estaba hecha, pero sus propiedades ópticas aun estaban por perfeccionar y por medir.

Vemos así que aunque el concepto de las comunicaciones ópticas, tal y como se conciben hoy, estaban presentes en el siglo XIX, no había surgido aun algo que aglutinara los desarrollos que se estaban produciendo. Bell solo entendía comunicaciones a través del aire. Wheeler únicamente veía a la luz guiada como un medio para iluminar hogares. Boys nunca llegó a pensar en introducir luz por sus fibras. Y Tyndall estimó que todos sus otros trabajos científicos eran más interesantes que los espectáculos que daba por provincias. En realidad, las comunicaciones ópticas eran, a finales del siglo pasado, algo ajeno a lo que la sociedad pedía. En consecuencia quedaron como curiosidad victoriana, igual que las atracciones de feria o los inventos de artilugios imposibles.

1.4 Primeros pasos de las comunicaciones ópticas: Década de los sesenta.

En 1960 nació el láser. T.H. Maiman, basándose en el máser de J.P. Gordon, H.J. Zieger y C.H. Townes, presentado seis años antes, encontró la forma de obtener una radiación óptica coherente, teniendo como material base al rubí. Con este hecho se tuvo la posibilidad de disponer fuentes de luz de intensidad tan alta como fuera preciso y, en consecuencia, despertar ideas que habían sido arrinconadas hasta que un hecho así tuviera lugar. Es curioso señalar que así como la invención del transistor en 1948 pasó prácticamente desapercibida para el gran público, la del láser, o máser óptico como empezó a ser llamado en un principio, constituyó un verdadero aldabonazo en todos los medios de difusión. El “rayo de la muerte”, como era designado en los periódicos, pronto se constituyó en emblema de los desarrollos de la ingeniería del siglo XX. Quizás novelas como “The War of the Worlds” de H.G. Wells, pavimentaran el camino. La idea de un rayo destructor es algo que siempre ha alimentado el miedo de los mortales. Solo hay que recordar los rayos que salían de las manos de Zeus en la mitología griega.

Pero el láser no era el rayo de la muerte. Como se dijo en muchos sitios, era una solución a la búsqueda de un problema. Y uno de esos problemas eran las comunicaciones ópticas. El seguir la pista a cómo se fueron desarrollando éstas a partir de 1960 puede hacerse de muchas formas. En este caso voy a seguir tan solo una: la que van trazando los “Proceedings of the IEEE”, desde el nacimiento de su segunda época, en 1963, y precisamente con un número extraordinario dedicado a “Quantum Electronics” cuyo primer artículo era: “The Laser”. Seguir la historia de las comunicaciones ópticas desde esa atalaya lleva consigo el, quizás, mirar solo una perspectiva. Pero creo que para el objetivo de estas líneas puede ser conveniente restringirnos tan solo a esa visión. Otras podrían complementarla, pero el resultado final sería muy similar y alargaría innecesariamente las conclusiones.

El primer hecho que merece ser considerado es que, en los primeros años sesenta, el único objetivo que aparece en la literatura es el de cómo aprovechar el ancho de banda que podía proporcionar el láser. O dicho de otra manera, cómo pasar de las microondas a las frecuencias ópticas. Apenas aparecen indicios de que alguien propusiera un medio de transmisión que no fuera el aire. La mayor parte de las experiencias realizadas en el laboratorio tenían lugar entre un emisor y un receptor, separados por el espacio libre. Y es también significativo que gran parte de los experimentos de transmisión de información que

aparecen en la literatura siguieran las mismas pautas de los métodos de comunicación que se empleaban en aquel momento y que se consideraban los más sofisticados. En concreto, en varios de los artículos que aparecen en el antedicho número de los Proc. del IEEE, y que tienen que ver con transmisión, aparecen sistemas de comunicaciones, como el que aparece en la Fig. 1.1, que son, como se dice en uno de ellos [6], “almost an exact analog of its lower frequency counterpart”. El esquema planteado, típico de un sistema heterodino, es el que con

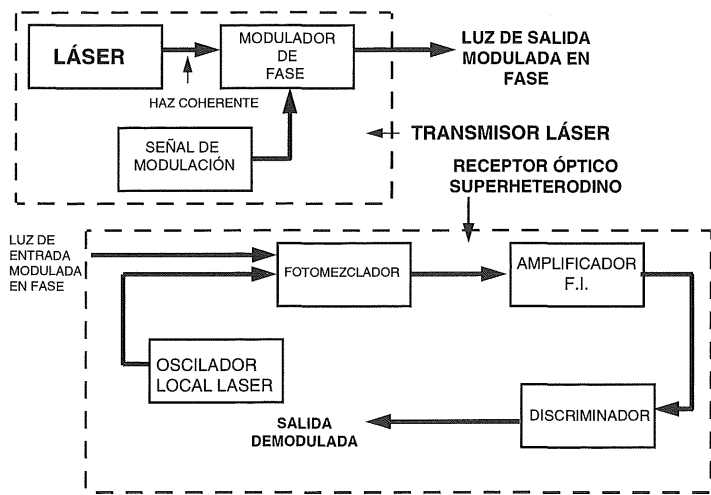


Figura 1.1 Sistema propuesto, en 1963, de comunicaciones con láser (C.J. Peters [6]).

ligeras variantes se sigue empleando cuando se habla de comunicaciones ópticas coherentes. Dado que los únicos láseres que existían en aquel momento eran de onda continua, era preciso suministrar la información a través de un modulador externo que, en este caso, modulaba en fase a la luz. En la recepción, la señal recibida se mezclaba con la de un oscilador local (otro láser de rubí) en un fototubo de microondas, dando lugar a otra señal que ya solo contaba con la información transmitida. En el mismo artículo se menciona otro hecho que ha sido caballo de batalla durante muchos años: el de las ventajas de los sistemas coherentes sobre los otros. Se señala que quizás podría haber sido más aconsejable una simple modulación en amplitud, que habría dado lugar a una recepción más simple al eliminar el oscilador local y el mezclador

de microondas. El autor señala: *“However, the local oscillator-mixer stage type of receiver is inherently much more sensitive because of its narrow noise bandwidth at the optical frequencies. This feature cannot be duplicated by the simple phototube. Comparison between the two techniques is similar in relative performance to the superheterodyne receiver and the crystal video receiver. For good receiver sensitivity one should use the superheterodyne mixer stage for both phase modulation and for amplitude modulation”*. Esta controversia se ha mantenido a lo largo de los años. En este momento, la posición de superioridad de los sistemas coherentes sobre los otros está en franco declive. Pero hace no más de seis o siete, las cosas eran muy distintas. Es de suponer que en los próximos años la discusión siga.

Tres años después, los mismos “Proceedings of the IEEE” dedicaron otro número especial a temas relacionados con los que aquí nos ocupan. El título del número era “Optical Electronics” y en él el énfasis se daba principalmente a los nuevos tipos de láseres que habían surgido en los últimos años, así como a diferentes técnicas de modulación del haz láser.

En uno de los artículos [7] que allí aparecen se presentaba la situación, en ese momento, de los láseres de semiconductor. Recordemos que estamos hablando de 1966, esto es, hace tan solo unos treinta años. Los láseres de semiconductor que existían en ese momento, si se quería que trabajasen en régimen de onda continua era preciso mantenerlos a temperaturas de unos pocos grados Kelvin. En concreto, baños de nitrógeno, hidrógeno y helio líquidos eran frecuentemente usados, dependiendo de la temperatura a la que se quisiera trabajar y las propiedades que se esperase alcanzar. A temperatura ambiente, únicamente se habían obtenido pulsos de unos pocos cientos de nanosegundos. Las gráficas que muestran los resultados obtenidos para uno de los diodos presentados, muestran que la potencia de pico, unos 810 mW, se alcanza para una corriente de 2,5 amperios. La temperatura de trabajo era de 77° K. Cuando se trata de trabajar a temperatura ambiente, las densidades de corriente umbral se sitúan en magnitudes del orden de los 100.000 A/cm². ¿Cuál era la razón de un comportamiento tan alejado de lo deseado? La principal causa no era otra que la estructura empleada.

Como puede verse en la Fig. 1.2, tomada directamente de dicho artículo, los láseres con los que se trabajaba eran los que hoy conocemos como láseres de homounión. En ellos, el material que compone las dos regiones que lo forman es el mismo: un compuesto III-

V, por lo general AsGa. Debido a ello, la zona en la que se produce la recombinación de electrones y huecos, para generar el correspondiente fotón, es la unión, que por la razón

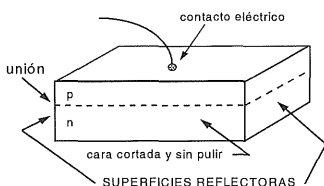


Figura 1.2 Esquema de un láser de unión p-n (Nathan, 1966 [7]).

evidente de cómo es la estructura del láser, ocupa una superficie igual a la de éste. Con el conocimiento que tenemos hoy de los láseres de semiconductor ya podemos decir porqué esta estructura no es lo eficiente que debería. Pero para no adelantarnos, es preferible dar aquí las razones que apunta Nathan [7] en su artículo. Dice: *“For CW operation, it is desirable to make the laser very narrow, that is, with a high ratio of length to width in the junction plane. Keyes has shown that in order to achieve CW operation at room temperature with currently available threshold current densities, it would be necessary to make laser with a length to width ratio of several hundred. This is beyond the present state-of-the-art”*. Como se sabe hoy, la solución era otra. Pero para llegar a ella era preciso contar con conceptos próximos a los empleados para el guiado de luz y estos todavía no habían sido puestos en acción. Al final de artículo, Nathan apunta algunas posibles aplicaciones para los láseres de semiconductor. Aparte de las comunicaciones ópticas, hecho que para todos era incuestionable, señala las de computadores ópticos y amplificadores de radiación óptica. Ambas han sido planteadas en años posteriores con éxito desigual. Una de ellas, de hecho, la de los computadores ópticos, merece un artículo entero dedicado a ella en ese mismo número de los Proceedings del IEEE. Pero dejando aparte esas otras posibles aplicaciones, el hecho fundamental era que ya se disponía de una fuente con la capacidad suficiente para, cuando se perfeccionara, ser el posible emisor en un sistema de comunicaciones ópticas.

Por lo que se refiere al aspecto de la detección, la situación a finales de los sesenta no era muy diferente, al menos en concepto, de lo que hoy puede verse en los libros.

La tecnología del silicio se encontraba ya en un grado de desarrollo bastante avanzado y ello hacía que gran parte de las técnicas que luego se han asentado estuvieran dando sus primeros pasos. En concreto, merece especial mención el artículo de L.K. Anderson y B.J. McMurtry [8] dedicado a fotodetectores de alta velocidad. De él, una de las cosas que es digna de ser destacadas es, en concreto, su primera figura. Con ligeras variantes se ha repetido en innumerables libros y, de hecho, ha pasado a ser casi figura anónima, porque nadie menciona a su autor o autores. Es la que aquí aparece como Fig. 1.3. Como se aprecia, muestra las tres etapas que tienen lugar en cualquier detector de radiación óptica. En la primera se generan los portadores, merced a la luz incidente. En la segunda, estos portadores se multiplican gracias a algún tipo de proceso que tenga lugar en el dispositivo y que será característico de éste. Finalmente, la corriente resultante interacciona con la circuitería externa que se haya podido añadir y da lugar a la señal de salida. Cualquier sistema de detección que se estudie hoy sigue teniendo presente estos mismos conceptos.

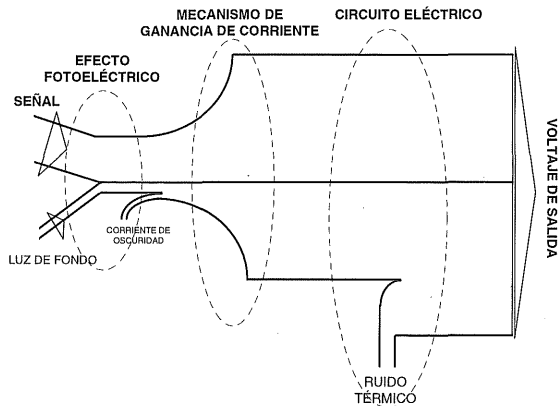


Figura 1.3 Proceso general de la fotodetección (Anderson et al, 1966).

Como es lógico, no todos los dispositivos que aparecen en el artículo mencionado siguen usándose hoy. En concreto, ninguno de los relacionados con válvulas de vacío puede encontrarse en un sistema en uso. Pero sí están presentes, en cambio, los allí denominados “fotodetectores de estado sólido o de efecto fotoeléctrico interno” y que son nuestros fotodiodos de hoy. Merece señalarse el hecho de que de todos los diodos de unión

p-n que podrían emplearse, los autores dedican especial interés a los de avalancha, conocidos hoy como APD's (Avalanche PhotoDiodes). Los pin les sirven únicamente de introducción. De todos los problemas que podrían presentarse, el derivado de la corriente de oscuridad es en el que se centran preferentemente y al que, indican, debe darse un especial cuidado. Como conclusión se plantea así el hecho de que, como en los emisores, el tema de la recepción, aunque necesitado de significativos avances en lo que se refiere a perfeccionamiento de las técnicas empleadas en la fabricación de los dispositivos, estaba también perfectamente definido y delimitado.

Queda ver qué tipos de sistemas de comunicaciones ópticas, en el año 66, se consideraban válidos. La comunicación a través del aire seguía siendo la principal candidata a ser empleada de forma extensiva. Pero ya se presentan algunas posibilidades de comunicaciones guiadas. En un artículo en ese mismo número, Miller y Tillotson [9] dan una visión panorámica de cuál era la situación en ese momento. Como diagrama de bloques siguen presentando uno análogo al que vimos en la Fig. 1.1, y que es el de la Fig. 1.4.

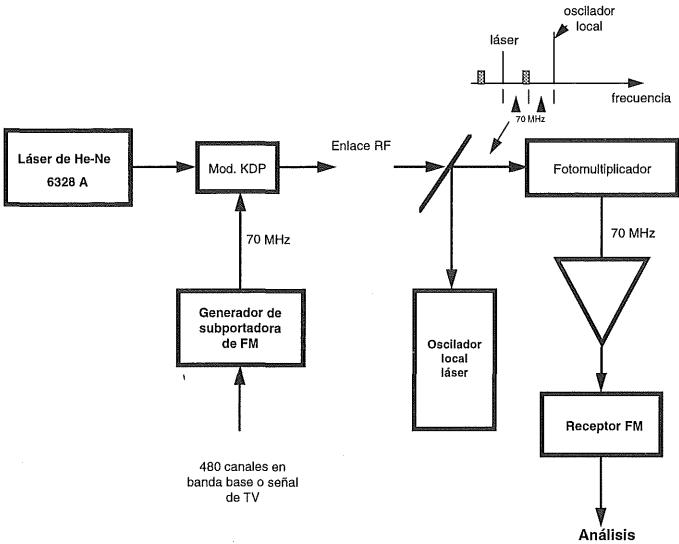


Figura 1.4.- Diagrama de bloques de un sistema experimental de comunicaciones ópticas (Miller et al. 1966).

La única diferencia de este sistema es que en lugar de láseres de rubí ya emplean láseres de He-Ne. Lo que quizás es curioso señalar es la defensa que hacen del uso de

láseres trabajando en el visible. Apuntan que las ventajas de poder ver el haz son superiores a cualquier desventaja que pudiera ofrecer. Tras un análisis de la propagación por la atmósfera y ver las atenuaciones y otros factores que influyen en la recepción, se detienen en la posibilidad de emplear guías cerradas para encaminar el haz. En todos los casos la solución pasa por tubos cerrados en los que se ha introducido un determinado tipo de gas. Para que el guiado sea efectivo, sería preciso añadir, de trecho en trecho, lentes que fueran reconformando el haz (Fig. 1.5.a). Para una distancia de 10 km. parece serían necesarias unas 100 lentes. Las posibles pérdidas que se tendrían serían de unos 0,2 dB/km. Una posibilidad que es estudiada es la de diseñar lentes (Fig. 1.5.b) en las que fluyese gas a través de un tubo que mantuviera su superficie a mayor temperatura que su eje. El gradiente térmico resultante daría lugar a que el

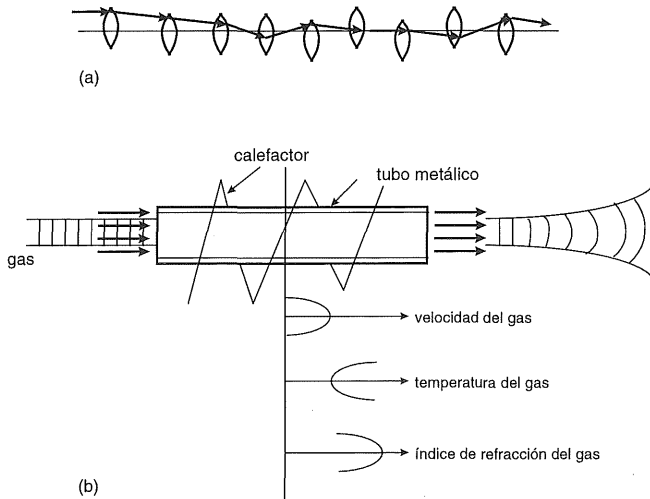


Figura 1.5 Guía de haces ópticos por medio de lentes (a) Trayectorias de los rayos en una secuencia de lentes con errores transversales en las posiciones de las mismas. (b) Esquema de una lente tubular de gas recalentado, con las correspondientes velocidades, temperatura e índice de refracción del gas (Miller et al. 1966 [9]).

índice de refracción en el centro sería superior al de las paredes, con el resultado de que se obtendría un efecto semejante al de una lente convexa. Indican que, en este caso, solo se tendrían como pérdidas las debidas a la dispersión de Rayleigh. Para una distancia de 10 km.

se requerirían unas 10^4 lentes de este tipo. Es interesante recalcar de este concepto dos hechos: la presencia de un medio con un índice gradual, análogo al que luego tendrán las fibras conocidas por ese apelativo, y la aparición de las pérdidas de Rayleigh como límite por debajo del cual no se puede pasar.

1.5 Las fibras ópticas y el inicio de las comunicaciones ópticas: Década de los setenta.

En Octubre de 1970, los Proceedings del IEEE volvieron a publicar un número extraordinario dedicado íntegramente al tema objeto de las presentes páginas. El volumen se designaba ya con el título de “Optical Communications” y su portada mostraba de una forma muy clara cuáles eran los campos de los que se iban a apoyar las mismas. De la suma de tres grandes bloques, la Óptica Física, la Electrónica Cuántica y la Teoría de la Comunicación, surgían las Comunicaciones Ópticas. Pocas veces en una portada se ha logrado una síntesis mejor de qué es una determinada tecnología o un campo de conocimiento. Los grandes apartados en los que se dividían los artículos publicados son ya los grandes bloques que se estudian hoy en cualquier tratado de este tema: dispositivos, canales ópticos, principios teóricos de las comunicaciones ópticas y sistemas específicos para aplicaciones concretas. De todos ellos, por razones puramente derivadas del esquema aquí adoptado, nos detendremos en primer lugar en los canales de transmisión y, en segundo lugar, en los sistemas.

K.C. Kao había publicado en 1966, con G.A. Hockham, un artículo [10] en el que señalaba, después de una serie de estudios de carácter esencialmente espectrométrico, que la principal causa de las pérdidas que se producían en una fibra de vidrio por la que se hacía pasar luz, eran las impurezas que se encontraban en la misma. Hasta entonces, pérdidas del orden de los 1000 dB/km eran usuales. Según indicaba, reduciendo el contenido de impurezas de óxidos, en particular los derivados de los iones de determinados metales de transición, hasta niveles de una parte por millón, podrían alcanzarse pérdidas del orden de los dB/km, lo que ya haría a las fibras comparables con otros sistemas en uso. A este artículo siguió otro [11] en 1968, también de Kao, en el que señalaba su imposibilidad de alcanzar el nivel deseado, quedándose en un orden de magnitud por encima. D. Gloge, en el número mencionado de los Proc. del IEEE, en un artículo dedicado a la transmisión por guías ópticas [12], apunta estos hechos, así como las dificultades que tenía la fabricación de fibras con la homogeneidad deseada. Debido a estos problemas, aunque una parte de su artículo lo dedica a las

posibilidades de las guías de fibra de vidrio, sigue apostando fuertemente por la transmisión a través de guías huecas como las apuntadas en el apartado anterior. Esta era, de hecho, la opinión más aceptada. Recordemos que esto se publicaba en el mes de octubre de 1970 y Gloge, de hecho, había escrito su artículo en el mes de mayo de ese mismo año.

En aquel momento, la mayor parte de los profesionales de la comunicación consideraron la opinión de Kao o bien una herejía intolerable o bien una pura extravagancia. Muy pocos la tomaron como una propuesta seria. No es posible saber si las primeras experiencias de laboratorio, siguiendo lo indicado por Kao y Hockham, se hicieron por el mero hecho de intentarlo o por estar convencidos de la verdad de lo que se había sugerido. El hecho fundamental es que algunas de las principales industrias de Telecomunicación de la época, y entre ellas la Corning Glass Works, el principal fabricante de vidrio del mundo, decidieron poner en práctica la idea apuntada por los anteriores investigadores.

La causa principal de la incredulidad mostrada por los expertos del ramo era que, al principio de los años 60, la atenuación que presentaban la mayor parte de los vidrios que podían ser usados para el fin deseado estaba por encima de los centenares de decibelios por kilómetro (dB/km). Kao y Hockham habían indicado, como se ha dicho antes, que la causa de estas elevadas pérdidas eran debidas a las imperfecciones que surgían en el proceso de fabricación de la fibra y, sobre todo, a las impurezas que podían estar presentes. En aquel momento se llegó a considerar que cuando la fibra llegase a una atenuación del orden de los 20 dB/km era cuando podía empezarse a pensar en ella como una solución viable.

Pero estaba en la mente de casi todos que ese valor estaba muy lejos de poder ser obtenido en un futuro cercano. Y todos pensaban así hasta el primero de octubre de 1970. En aquel día, en la sede londinense del IEE, al final de una mesa redonda dedicada a la comparación entre la transmisión de ondas milimétricas y por fibra óptica y que, hasta ese momento se había decantado netamente a favor de la primera, en un formidable golpe teatral, la Corning Glass, por boca del Dr. Maurer, anunció la obtención de una fibra con la atenuación deseada de 20 dB/km. Un mes después, los resultados aparecían en el “Applied Physics Letters” [13].

Esto supuso un vuelco total en el concepto de comunicaciones ópticas tenido hasta entonces y de hecho, su verdadero nacimiento con el concepto que hoy tenemos de ellas.

Una carrera contra reloj se produjo en los laboratorio más importantes de todo el mundo para conseguir fibras ópticas con características que hicieran posible su uso en cualquier tipo de aplicación. En [14] pueden verse algunas de las fases más importantes de esa carrera, así como la forma por la que se fueron mejorando sus propiedades. En la Fig. 1.6 puede verse cómo cambiaron éstas del comienzo de la década de los 70 al de los 80. La situación actual no se ha alterado ya significativamente con respecto a lo que allí se presenta.

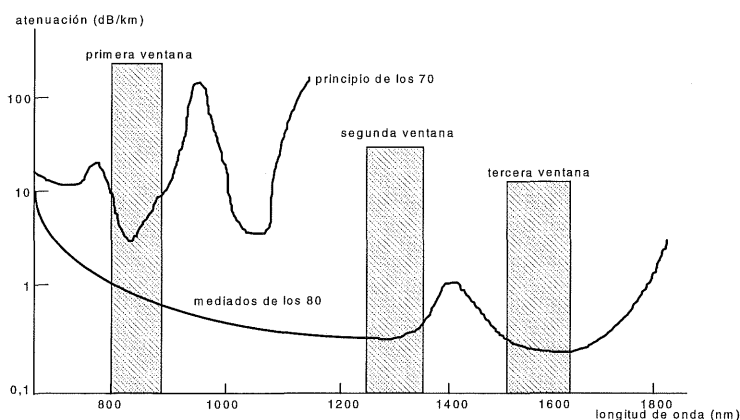


Figura 1.6 Atenuación de las fibras ópticas en función de la longitud de onda, para dos épocas características (Kaiser, 1991 [15]).

Emisores y fotodetectores, los otros dos elementos fundamentales de todo sistema de comunicaciones ópticas, seguían avanzando también de forma imparable. En el número de los Proceedings del IEEE que ahora nos ocupa aparece un artículo de Paoli y Ripper [16] en el que ya señalan las ventajas de emplear los láseres de semiconductor con una simple modulación en la amplitud de su señal de salida para transmitir información. Las comunicaciones del tipo coherente, planteadas casi como las únicas posibles hasta entonces, empiezan a perder fuerza. Es curioso analizar el artículo por lo que supone de avance con respecto a otros previos y por lo que él mismo muestra. Gran parte de su contenido se dedica a analizar cómo el láser de semiconductor puede trabajar emitiendo pulsos de luz modulados en amplitud y cómo esto puede aprovecharse en comunicaciones. Solo señalan como desventaja el que es muy difícil que trabajen en onda continua a temperatura ambiente. Pero al final del artículo añaden, de forma precipitada, lo siguiente: *“Since the writing of this article, continuous room-temperature operation of a double heterostructure laser has been achieved*

by Hayashi et al. Stripe geometry lasers have also been fabricated from material grown by M.B. Panish and have operated continuously at temperatures up to 355° K". El artículo había sido escrito en abril de ese mismo año.

A partir de entonces, el desarrollo de los sistemas de comunicaciones ópticas no se ha detenido. La historia podría seguirse a través de una serie de jalones más o menos significativos, pero creo que estaría menos llena del sentido de aventura que ha tenido la presentada hasta aquí. Las fibras ópticas han mejorado considerablemente sus propiedades y han visto reducir su precio de forma drástica. Otro tanto ha ocurrido con los dispositivos emisores, tanto láseres de semiconductor como LEDs, como con los receptores. De hecho, muy poco de lo que eran perspectivas de futuro hace menos de diez años no se ha hecho realidad en nuestros días. Por ello, y con el fin de completar la panorámica que se ha intentado dar en este capítulo, voy a dedicar unas breves líneas a presentar algunos de los retos que quedan y cómo las comunicaciones ópticas han sabido aglutinar campos antes parcialmente disjuntos.

1.6 Comunicación global e intercambio instantáneo de información: Visión desde la primera década del siglo XXI.

La configuración general, muy sobresimplificada, de un sistema de comunicaciones ópticas, como los que estaban en uso a finales del siglo XX, puede verse en la Fig. 1.7. En sus líneas maestras, poco se diferencia de la idea que se había desarrollado en la década de los ochenta. Sus partes esenciales, emisor de radiación óptica, canal de transmisión y elemento de recepción de luz, son las mismas. Entre medias, y con la base del gran desarrollo de componentes de todo tipo, activos y pasivos, que tuvo lugar en la primera mitad de los 90, se encuentra un conjunto de equipos y sistemas encargados de la realización de funciones de todo tipo. La comunicación no era ya en ese momento, como lo era en las primeras fases, solo punto a punto y con un único tipo de información transmitida. Por el contrario, mediante diversas técnicas de multiplexado, un usuario podía ya ponerse en contacto con varios e intercambiar entre sí cualquier tipo de señal. Como estamos viendo en

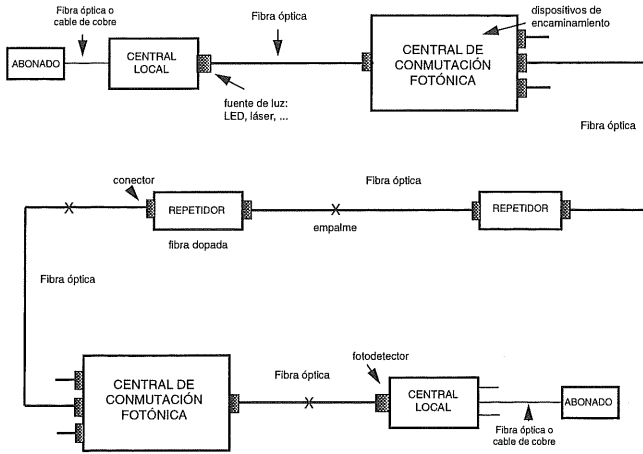


Figura 1.7 Esquema general de un sistema de comunicaciones ópticas de finales de los 90. En él aparecen detallados algunos de los componentes más significativos en los lugares en los que suelen aparecer; como es obvio, lo hacen también en muchos otros puntos.

nuestros días, voz, datos e imágenes, tanto fijas como en movimiento, constituían señales comunes que se transmitían por la fibra óptica. Gracias al fuerte desarrollo de centrales de conmutación fotónica, la luz era ya mucho más protagonista del sistema de lo que lo era hasta entonces. En dichas centrales, los elementos de encaminamiento de señales no eran simplemente acopladores o dispositivos electroópticos u optoelectrónicos, sino que también aparecieron ya, sin la profusión en que lo hacen hoy, circuitos integrados fotónicos con capacidad de ser ellos, al mismo tiempo, generadores, moduladores y receptores de radiación óptica. En los repetidores, por otra parte, hicieron acto de presencia elementos tan fundamentales como las fibras dopadas con tierras raras, en la mayor parte de los casos Erblio, que permitieron restaurar los pulsos de luz a intensidades adecuadas para su correcta detección. Los amplificadores ópticos, sueño durante mucho tiempo y algo usual hoy en cualquier sistema de comunicaciones ópticas, empezaron a ser omnipresentes. Pero como se ha visto después, en el repetidor no podían estar presentes solo estos amplificadores sino que eran precisos también otros componentes que fueran capaces de reconfigurar los pulsos a formas análogas a las que tenían cuando fueron emitidos. El ensanchamiento que se produce

en la transmisión impedía alcanzar la velocidad de transmisión deseada. Y para ello, estos pulsos han tomado ya, a partir de los primeros años del siglo XXI, las características de solitones, lo que garantiza el mantenimiento de su forma. Toda una nueva tecnología vemos cómo se está desarrollando en torno a este concepto y constituye una atractiva línea de investigación.

Muchos otros temas han nacido a raíz del asentamiento de las comunicaciones ópticas. Uno de ellos es el de su interconexión con los sistemas de comunicaciones móviles. Si importante es transmitir gran cantidad de información a gran velocidad y a grandes distancias, no lo es menos que pueda ser accesible a cualquier usuario en el punto que para él le sea más cómodo. Por ello, estos dos grandes mundos, el de las comunicaciones ópticas y el de las móviles, han debido aproximarse y unificar sus formas de trabajo. Los últimos años del siglo XX y los primeros del XXI son testigos de este hecho. Como también lo han sido de la unificación de los conceptos de multimedia, TV, servicios, entretenimiento, teletrabajo e incluso, de la introducción de conceptos fotónicos en los procesos de cálculo o de tratamiento de señales.

Pero esa es otra historia.

Bibliografía.

- [1] W.D. Smithers, "Chronicles of the Big Bend". Madrona Press. Austin. USA. 1976.
- [2] "Optical Fibre Communications. Devices, Circuits, and Systems", Eds.: M.J. Howes y D.V. Morgan. New York, U.S.A. John Wiley & Sons. 1980. (La referencia apuntada allí es: V. Aschoff, "Optische Nachrichtenübertragung im Klassischen Altertum", Nachrichtentechn. Z., vol. n° 30, pp. 23-28, 1977).
- [3] T. Carlyle, "The French Revolution", The Modern Library. Random House, Inc. New York. USA. 1968.
- [4] S. Olivé Roig, "Historia de la Telegrafía Óptica en España". Secretaría General de Comunicaciones. Ministerio de Transportes Turismo y Comunicaciones. Madrid, 1990.
- [5] A.G. Bell, "Selenium and the photophone", The Electrician, pp. 214, 215, 220, 221, 1880.
- [6] C.J. Peters, "Gigacycle Bandwidth Coherent Light Travelling-Wave Phase Modulator". Proc. IEEE, vol. 51, pp. 147-153. 1963.
- [7] M.I. Nathan, "Semiconductor Lasers", Proc. IEEE, vol. 54, pp. 1276 - 1290. 1966.

- [8] L.K. Anderson y B.J. McMurtry, "High-Speed Photodetectors", Proc. IEEE, vol. 54, pp. 1335 - 1349. 1966.
- [9] S.E. Miller y L.C. Tillotson, "Optical Transmission Research", Proc. IEEE, vol. 54, pp. 1300 - 1311. 1966.
- [10] K.C. Kao y G.A. Hockham, "Dielectric-fiber surface waveguides for optical frequencies". Proc. IEE (London), vol 113, pp. 1151-1158. July 1966.
- [11] K.C. Kao y T.W. Davies, "Spectrophotometric studies of ultra low loss optical glasses - I: single beam method". J.Sci.Instrum., vol. 1, ser. 2, pp. 1063-1088. November, 1968.
- [12] D. Gloge, "Optical Waveguide Transmission". Proc. IEEE, vol. 58, pp. 1513 - 1522. 1970.
- [13] F.P. Kapron, D.B. Keck y R.D. Maurer, "Radiation losses in glass optical waveguides". Appl. Phys. Lett., vol. 17, pp. 423-425, Nov. 1970.
- [14] C. Someda y J.A. Martín-Pereda, "La luz como portadora de información. Las fibras ópticas". Anuario 1996 "Ciencia, Tecnología, Medio Ambiente", Ediciones EL PAÍS, pp. 384-391 (1995).
- [15] G. Keiser, "Optical Fiber Communications". Mc-Graw Hill. Auckland, 1991. Segunda Edición.
- [16] T.L. Paoli y J.E. Ripper, "Direct Modulation of Semiconductor Lasers". Proc. IEEE, vol. 58, pp. 1457 - 1465. 1970.